氢原子钟的数字温控设计

孙长嫔[1,2]，刘铁新[1]，李锡瑞[1]

（1. 中国科学院上海天文台，上海 200030；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要：该设计的目的是实现氢原子钟的数字温度控制。基于温度检测和控制的基本原理设计一套有两级控温（包括氢钟内炉和外炉）的恒温控制系统，温度控制系统主要由电桥电路、模数转换电路、温度计算和比例积分微分（Proportional-Integral-Derivative，PID）控制系统，脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation ，PWM）输出电路、加热丝组成。在环境温度 21℃到 25℃时，实现了数字温控系统 0.002℃的温度稳定度，证明了数字电路对氢钟控温的可行性。

关键词：数字温控；氢原子钟；PID（比例积分微分）控制；两级控温

中图分类号：TB939　　**文献标识码**：A　　　文章编号：1672-7673（2023）

随着科学技术水平的不断提高，时间作为研究自然规律恒定不变的标尺，人们对其准确性和稳定性提出了更高的要求。氢原子钟作为一种高精度的时间和频率标准，因其较好的短期和长期频率稳定度而广泛的应用于需要高精度时频信号的领域。由于腔牵引效应等因素的影响，氢原子钟谐振腔的温度变化是影响输出频率稳定度的重要因素，因此，谐振腔良好的恒温环境是保证氢原子钟稳定度的手段之一[1]。

自激型氢脉泽由于自身的特点（高 Q 值微波腔)，对环境温度提出了非常苛刻的要求，目前国际上的常规要求小于±0.01 ℃。文[2]使用国产热敏电阻进行氢原子钟的温度控制系统设计，最终实现了模拟电路系统的控温精度优于 0.01℃。

本文通过分析谐振腔温度变化对频率稳定度的影响，从实际功能出发，完成各功能设计。温度检测方案采用恒压源电桥电路驱动 NTC 型热敏电阻，并根据分辨率的设计要求，使用 ADS1256 作为 A/D 模数转换芯片，同时利用滑动窗口滤波对数据进行降噪处理，进一步提高温度检测的准确性。

1　方案设计

1.1　氢原子钟热结构的物理部分

因为要对谐振腔的温度进行有效的控制，目前氢钟从外到内的结构为外层磁屏蔽、中外层磁屏蔽、中内层磁屏蔽、恒温筒（即外炉）、内层屏蔽、C 场钟罩、真空钟罩（即内炉）。

出于加热功率和控温精度的考虑，氢钟的温度控制系统由两级主要控制组成，即内炉和外炉，为了达到氢原子的跃迁频率，谐振腔的温度要保持在 40℃到 50℃温度范围内，采用多等温炉和多控制区的方式，使热流动和温度梯度最小化[3]。

1.2　测温电阻的选择

目前，国际上根据氢钟的特点及控温系统自身限制，比较一致的要求是钟控温精度小于等于 0.01℃。若选择铂电阻作为测温电阻，当被控体温度变化 0.01℃，铂电阻的变化仅 0.004Ω，很难被温度检测电桥电路检测到，并且导线电阻、接触电阻的变化往往会掩盖铂电阻的变化。所以铂电阻热敏感性较为迟钝，灵敏度低，无法达到控温精度要求。热敏电阻就可以很好地弥补铂电阻的不足，另外热敏电阻的灵敏度极高，被控体温度的微小变化（0.01℃左右）能有效地在检测电桥上反映，无须用提高桥路电流的办法弥补，热敏电阻的工作电流可严格地控制在标称值 100uA 以下,避免由于热敏电阻的自热而引入的误差。因而选择热敏电阻作为氢钟温控的测温电阻。

另外，为了保证内炉三个单元和外炉两个单元之间温度一致性，必须选用一致性好的热敏电阻。温控一致性的先决条件是各单元控温热敏电阻在同一设定温度点的阻值一致性小于 25Ω。对此我们采用工厂粗选和实验室精选两项措施来满足热敏电阻的一致性。 工厂粗选是使用工厂的现有设备（油槽），在 25℃条件下挑选一致性好于 50Ω的器件；实验室精选是使用实验室制作的 50℃的控温槽（因为氢钟的温度会控制

在 40℃到 50℃之间），把一组 20 个左右的热敏电阻置于恒温槽中，每一电阻均需用导线引出到恒温槽外，待恒温槽充分平衡后测量每个热敏电阻的阻值，然后挑选其中一致性小于 15Ω的电阻。经过工厂粗选和实验室精选之后可以认为热敏电阻一致性已经达到甚至超过了史密松天文台的水平[4]。

1.3　具体方案

为了实现该数字温控设计对谐振腔的温度控制，我们采用热敏电阻连接到温度采集电桥电路中，对采集电路的电压进行模数转换，进行后续的温度计算和 PID 控制 PWM 的输出,从而实现对加热功率的控制。总体方案如图 1。

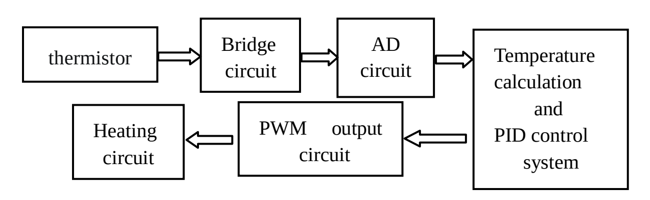


图 1　具体设计方案

Fig.1　Specific design scheme

1.4　电桥电路

热敏电阻贴在不同温度控制区的壁上，它的阻值随着内外炉温度的变化而变化，测温电路需要将阻值的变化转换为电压信号的变化，为了实现这种变化，一般常用两种电路实现：（1）需要恒压的电桥测温电路；（2）恒流源式测温电路。本设计采用电桥测温电路。这种电路的特点是通过分压方式得到热敏电阻两端的电压，进而得到热敏电阻的阻值，然后经过一系列公式换算，最终完成温度的测量[5-6]。

电桥测温电路如图 2。其中 R_1，R_2，R_3 为精度为±0.1%，温漂为 5ppm/℃的高精密电阻，R_t 为热敏电阻，型号为：MF5H，R_{25}=5.0339kΩ，B=3945.10。当温度变化时，Rt 的阻值会改变，R_1，R_2，R_3 的阻值不会改变，因此 U_2 处的电压不变，U_1 处的电压发生变化，电桥两臂的电压差：

$$\Delta U = U1 - U2 = 2.5V \bullet \left(\frac{R1}{Rt + R1} - \frac{R3}{R2 + R3}\right) \quad (1)$$

图 2　电桥测温电路

Fig.2　Bridge temperature measuring circuit

因氢原子钟有多个温度控制区，设计的平衡电桥如图 3 。

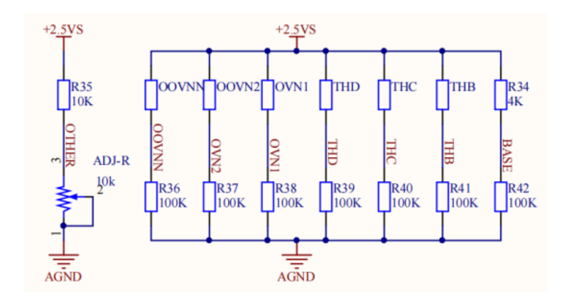


图 3　多温度控制区的电桥测温电路

Fig.3　Bridge temperature measuring circuit in multi - temperature control area

因此，电桥两臂输出构成差分信号输入到主控制芯片的模数转换器的输入端，在主控制芯片内部可以通过ΔU 计算 Rt，进而通过此热敏电阻拟合的温度-阻值关系公式计算此时的温度。

因热敏电阻阻值为 $R = R_{25} \bullet \mathrm{e}^{B\bullet(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0})}$， （2）

其中，R_{25} 为温度为 25℃时的零功率电阻温度系数；T 为温度；T_0 为 25 摄氏度。则当前温度为

$$T = \frac{1}{\frac{\ln\frac{R}{R_{25}}}{B} + \frac{1}{T_0}}. \qquad (3)$$

1.5　模数电路设计

为了达到分辨率的要求，获得高精度的电压值，我们选择 24 位模数转换芯片 ADS1256。它具有高达 23 位的无噪声分辨率和 30KSPS 的数据输出率，内部还有数字滤波器，可以对测得的数据进行初步滤波，进一步提高了读取结果的准确性。氢原子钟的数字控温设计的模数电路设计如图 4。

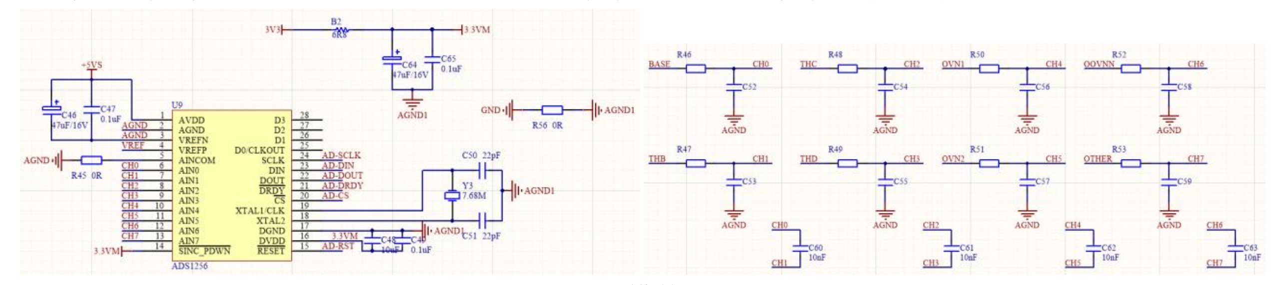


图 4　模数电路设计

Fig.4　AD Circuit Design

1.6 滑动窗口滤波

在高精度温度测量和控制系统中，去噪是数据处理的一项重要工作，直接影响后续数据处理结果的稳定性和可靠性。通过滑动窗口的混合滤波算法对电压信号中混入的噪声进行去噪与滤波处理。该混合滤波算法实现流程如下：首先按顺序截取系统采集的 $N*M$ 个电压数值，将这些电压数值按采集顺序分成 N 组，每组 M 个数。利用中位值滤波法，将各组中的 M 个数值分别按从小到大排列并选取中间值为每组的有效值，如此，从 $N*M$ 个电压数值中选取了 N 个数，将这 N 个数按采集顺序的先后排列，分别记为 U_1, U_2, U_3 ，…，U_n，然后经过滑动窗口滤波，滑动窗口滤波将最新一次采样值和过去的 N-1 次采样值一起求平均，每新采集一个数据便存入暂存区，同时去掉一个最老数据，保存这 N 个数据始终是更新的数据。

采集的电压信号经混合滤波算法处理后，可以滤除混杂在其中的噪声信号和干扰信号，从而使得由电压信号转换后的温度信号抖动很小，满足了该系统传感器精度检测的相关要求[7]。

1.7 温度计算

内炉和外炉有多个控温区，为了热流动和温度梯度最小化，每个区的设置温度略有差别。温度计算的流程图如图 5。温度计算和 PID 控制算法根据电桥电路的电压差确定当前温度，并根据当前温度与目标温度的差值确定 PID 控制的输出量[8]。

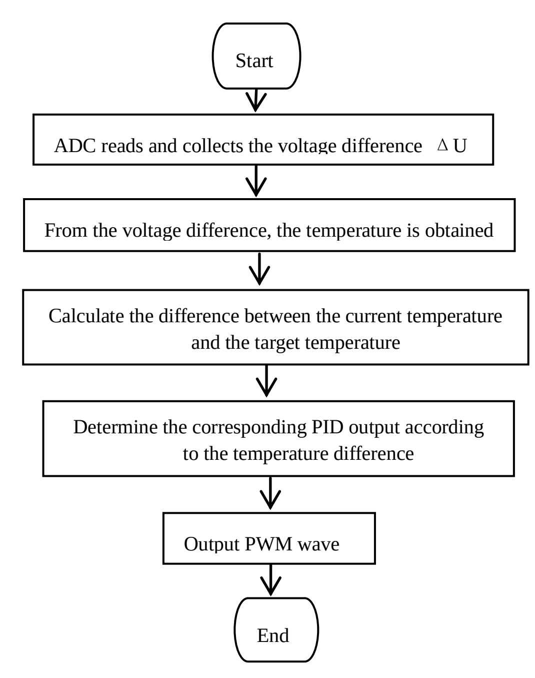


图 5 温度计算和 PID 控制系统流程图

Fig.5 Flow chart of temperature calculation and PID control system

1.8 模糊 PID 控制算法设计

通过对偏差的比例、积分和微分进行控制，称为 PID 控制器，其原理框图如图 6。 其中， $r(t)$ 为给定温度参数； $c(t)$ 为系统中实际的温度输出值； $e(t)$ 为主控制器部分温度的输入值； $u(t)$ 为 PID 控制器的输出同时也是被控对象的输入，其控制核心公式为

$$u(t)=K_P[e(t)+\frac{1}{T_I}\int_0^1 e(t)dt+T_D\frac{de(t)}{dt}] \quad . \tag{4}$$

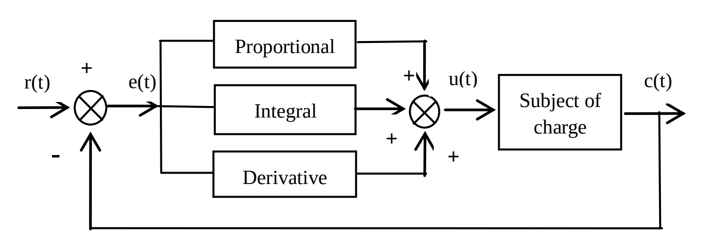


图 6 PID 控制系统原理框图

Fig.6 Block diagram of PID control system

模糊控制系统主要由 3 个部分组成，分别为模糊化、模糊推理和解模糊以及规则库，基本原理结构如图 7[9]。

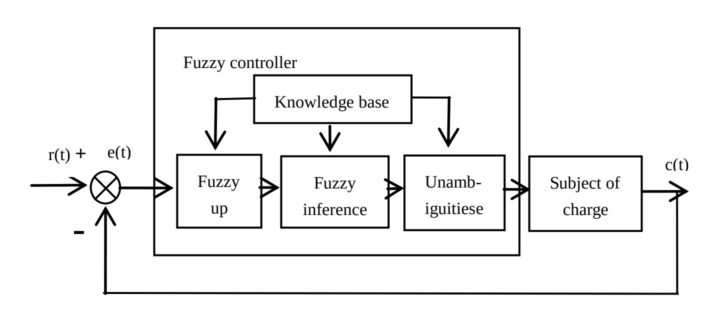


图 7　模糊控制原理结构

Fig.7　Fuzzy control principle structure

在数月的实验过程中，我们通过不断改善 PID 算法，分析在不同算法时谐振腔的温度稳定度，最终选择最满足氢钟恒温系统的模糊 PID 算法。

1.9 加热模块/功率驱动模块

计数芯片输出的 PWM 所提供的功率远远达不到加热模块所需要的功率，因此，我们需要在 PWM 输出电路后增加功率驱动电路，如图 8[10-11]。

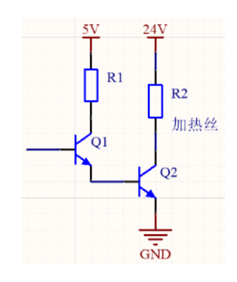


图 8　功率驱动电路

Fig.8　Power drive circuit

2　实验

2.1 实验搭建

炉体部分由加热炉体、加热丝、控温热敏电阻和检测电阻等组成，加热模块使用双绞加热丝。双线绞绕的方式可以避免电流产生磁场，以免影响脉泽振荡信号的频率和强度，同时加热丝与筒壁是绝缘的。测温电阻用于温度检测和控温精度检测等工作。

氢原子钟有多个温度控制区，各个温度控制区的热敏电阻和加热丝连接数字板。将数字板放入定制的屏蔽盒内，从而降低外界干扰对数字板的影响。同时用数字万用表监测内外炉腔中的检测电阻，得出内外炉的温度稳定性。

2.2 室温变化

2022 年 10 月 29 日 16:05 到 2022 年 10 月 31 日 2:18，我们用数字万用表监测实验室的室温变化，采样时间为一分钟间隔，得到 2053 个数据。通过热敏电阻的阻值计算出温度，如图 9。由图 9 可知，室温变化为 21℃到 25℃。

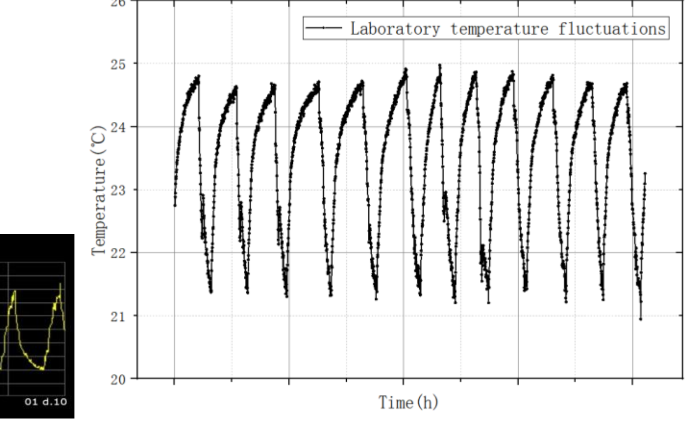


图 9　实验室温度波动

Fig.9　Laboratory temperature fluctuation

2.3 氢钟内外炉温度波动

在室温 21℃到 25℃的环境下，外炉温度设置为 37℃，内炉温度设置为 45℃。用六位半的数字万用表对贴在内外炉筒体壁上的热敏电阻阻值进行实时采集，然后根据热敏电阻阻值-温度关系，得出温度值，从而实现温度数据的实时监控。采样时间间隔为一分钟，监控至少一昼夜。

另外，因恒温系统受外界环境温度波动的影响，即不同的环境温度下，恒温系统的稳定度不同。因此，在同一室温环境下，通过搭建实验平台，进行现有的模拟电路温控系统与该数字电路温控系统的对比实验，可以更直观地展现模拟和数字的不同控温效果。对外炉热敏电阻进行至少一昼夜的阻值监控，其温度波动如图 10。由图 10 可知，外炉的温度波动在 0.2℃左右。通过对外炉的温度控制，可以将实验室 4℃左右的温度波动，缩小为 0.2℃左右的温度波动。对氢钟原有模拟温控电路进行监控，内炉的温度波动如图 11。由图 11 可知，模拟板可以将内炉的温度波动控制在 0.05℃左右。

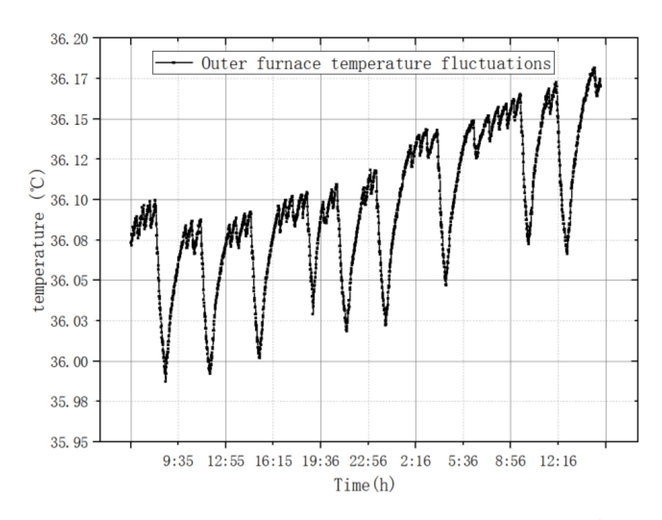


图 10　氢原子钟外炉温度波动

Fig.10　Hydrogen atom temperature fluctuation outside the bell furnace

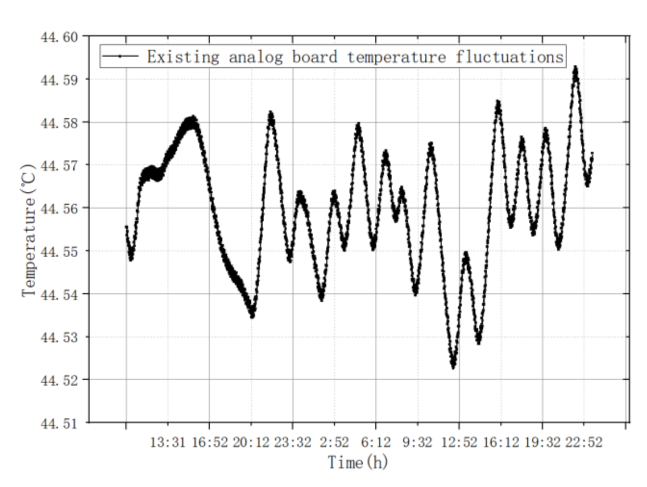


图 11 氢原子钟内炉温度波动—模拟板

Fig.11 Furnace temperature fluctuations in hydrogen atom clock -- simulation plate

数字电路可以通过调节 PID 算法，不断改善温控效果，当数字控温电路连接到氢原子钟，对内炉热敏电阻进行至少一昼夜的阻值监控。加电后，内炉温度变化到稳定的情况如图 12，稳定后的温度波动如图 13。由图 13 可知，数字板可以将内炉温度波动控制在±0.004℃左右。

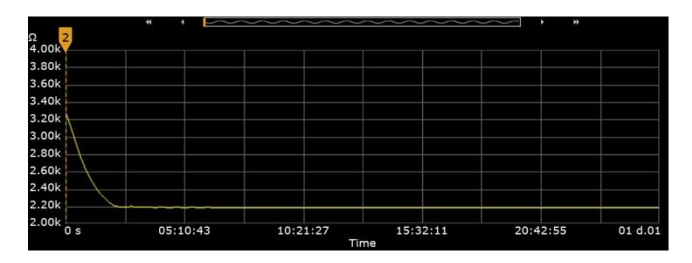
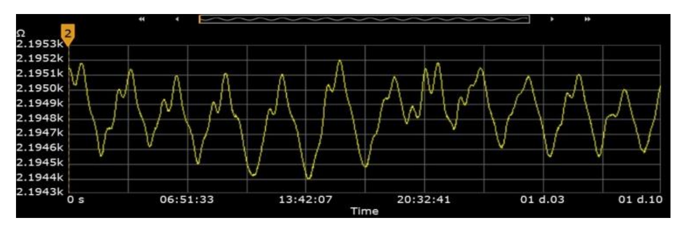


图 12 加电后，用数字板控制时内炉温度变化的趋势

Fig.12 After power, the digital board is used to control the temperature change trend of the inner furnace



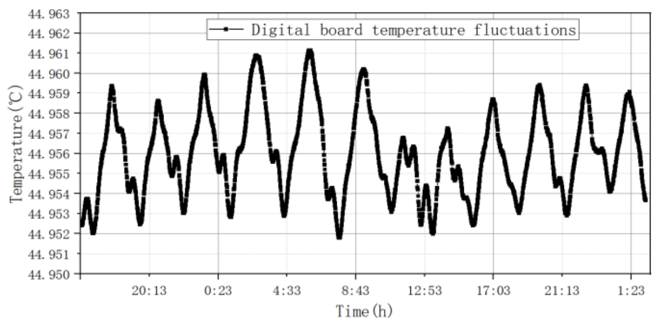


图 13 氢原子钟内炉温度波动—数字板

Fig.13 Hydrogen atom clock furnace temperature fluctuation -- digital plate

标准差是衡量一个样本波动大小的量，样本标准差越大，样本数据的波动越大。标准差公式为

$$S=\sqrt{\frac{1}{n}[(x_1-\bar{x})^2+(x_2-\bar{x})^2+\Lambda+(x_n-\bar{x})^2]}\,, \qquad (5)$$

其中，$\bar{x}$ 为平均值；n 为样本总数；x_1、x_2 Λ x_n 为样本的值。对数字温控电路板的温度数据进行计算，可以得到标准差为 0.002，即温度稳定度为 0.002℃。

此外，氢原子钟内炉的温度稳定度受环境影响很大，环境温度波动不同，经过控温后的温度稳定度也不同。但限于目前无法为实验提供更好的环境温度稳定度。我们在较大的环境温度波动下（21℃到 25℃的波动下）进行了数字板和模拟板的对比实验，实验结果表明数字板控温是可行的。

3　结论

本文采用数字温控方式，通过硬件电路的设计和不断改进 PID 控制算法，在室温 21℃到 25℃的环境下，氢钟经过外内炉两级控温系统，最终实现了 0.002℃的温度稳定度。

参考文献

[1] 翟造成.氢脉泽谐振腔频率-温度效应分析[J].宇航计测技术,2006(5):7-11.

ZHAI Z C. Frequency-temperature effects analysis on hydrogen maser microwave cavity [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement,2006(5):7-11.

[2] 彭纪兴.上海天文台氢原子钟热敏电阻控温系统[J].中国科学院上海天文台年刊,1997(1):214-219.

PENG J X. Thermistor thermal control system on the hydrogen clock at Shanghai Observatory[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1997(1):214-219.

[3] 翟造成，杨浩．氢原子钟频率稳定度的系统效应[C]//全国时间频率学术会议集.2007.

ZHAI Z C. YANG H. Systematic effects on frequency Stability of Hydrogen atom clock [C]// Proceedings of the National Conference on Time and Frequency. 2007.

[4] 彭纪兴．氢钟中使用热敏电阻控温的几个问题【J】.陕西天文台台刊，1997，20：24-28.

PENG J X. Several points on using thermistors in Hydrogen clock thermal control system[J]. Publications of the Shaanxi Astronomical Observatory, 1997,20: 24-28.

[5]彭科,张燕军,张为群,等.SOHM-4 型氢原子钟的设计改进与初步性能[J].时间频率学报,2004,27(1):41-47.

PENG K, ZHANG Y J, ZHANG W Q,　et al. Design improvement and performance expectation of Hydrogen maser SOHM-4 [J]. Journal of Time and Frequency,2004,27(1):41-47.

[6]刘长川．氢原子钟谐振腔超高稳定温度控制系统[D].南京：东南大学,2015.

LIU C C. High stability temperature control system of the H-maser resonant cavity [D]. Nanjing: Southeast University,2015.

[7] LI X, FENG A, CAI Y, et al. Research on digital cavity thermal control techniques for performance improvements of Hydrogen masers[C]//Proceedings of the　15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). 2021:27-31.

[8] LU T H, FEI C, XUAN L, et al. Intelligent modeling and design of a novel temperature control system for a cantilever-based gas-sensitive material analyzer[J]. IEEE Access, 2021,9:21132-21148.

[9]龚育林.基于模糊　PID　自适应整定参数的反应釜温度控制系统[J].东莞理工学院学报,2021,28(1):102-106.

GONG Y L. Temperature control system of reactor based on fuzzy PID adaptive setting parameters [J]. Journal of Dongguan University of Technology, 201,28(1):102-106.

[10]张倩倩．氢原子钟恒温控制系统设计[D]．西安:西安电子科技大学,2020.

ZHANG Q Q. Design of temperature control system for Hydrogen maser [D]. Xi'an:Xidian University,2020.

[11]彭科．氢原子钟高精度恒温系统设计[D]．上海:中国科学院上海天文台,2005.

PENG K. Design of high precision constant temperature system for Hydrogen maser [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences,2005.

Digital Temperature Control Design of Hydrogen Maser

Sun Changpin [1,2] ， Liu Tiexin [1]， Li Xirui [1]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China，Email: sunchangpin@shao.ac.cn;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract：The purpose of this design is to realize the digital temperature control of the hydrogen maser. Is based on the basic principle of temperature detection and control design of a two-stage temperature control system (including the hydrogen maser inside the furnace and the furnace), the temperature control system is mainly composed of bridge circuit, analog-to-digital conversion circuit, temperature calculation and PID (proportional integral differential) control system, PWM (pulse width modulation) output circuit, heating wire. When the ambient temperature fluctuates from 21℃ to 25℃, the digital temperature control system achieves the temperature stability of 0.002℃, which proves the feasibility of the digital board to control the temperature of the hydrogen maser.

Key words：digital temperature control; Hydrogen maser; PID control; two-stage temperature control